中国生态农业学报 2016 年 2 月 第 24 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2016, 24(2): 142−153

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150781

施肥深度对生土地玉米根系及根际土壤肥力垂直分布的影响*

苏志峰[1] 杨文平[2] 杜天庆[1] 郝教敏[3] 孙 敏[1] 高志强[1] 杨珍平[1**]

(1. 山西农业大学农学院 太谷 030801; 2. 华北理工大学生命科学学院 唐山 063000;
3. 山西农业大学食品学院 太谷 030801)

摘 要 为探明施肥深度对生土地玉米(*Zea mays* L.)地上部生产力、根系及根际土壤肥力的影响, 连续 2 年以黄土母质生土为供试土壤, 采用根管土柱法, 以不施肥为对照, 研究不同深度(0~20 cm、60~80 cm、100~120 cm、140~160 cm 和 180~200 cm)施用生物有机肥对玉米地上部生产力及根重、根际土壤酶活性、根际土壤养分含量垂直分布的影响。结果表明: 1)在 0~200 cm 土层范围内, 随施肥深度的加深, 玉米地上部生产力、总根重等指标均呈先增加后减少的规律。施肥深度在 100~120 cm 处的玉米总根重(52.3 g)及地上部生产力(361.0 g)最大。2)所有施肥深度的根重垂直分布均呈"T"型, 以 0~20 cm 耕层根重最大, 占总根重的 50%左右, 随根系下延, 根重明显递减($P<0.05$)。施肥深度 100~120 cm 可以获得最大总根重和 0~40 cm 耕层根重(27.19 g)。根系 N、P 和 K 养分积累适中, 平均分别为 6.60 g·kg^{-1}、2.38 g·kg^{-1} 和 8.16 g·kg^{-1}。3)施肥明显提高根际土壤酶活性和养分含量。施肥深度为 60~80 cm, 0~200 cm 土层根际土壤脲酶活性较高, 介于 0.108~0.354 mg(NH_3-N)·g^{-1}(soil)·24h^{-1}; 施肥深度为 140~160 cm 时, 0~200 cm 土层根际土壤蔗糖酶活性和速效磷含量较高, 分别为 12.9~19.6 mg(glucose)·g^{-1}(soil)·24h^{-1} 和 4.31~6.02 mg·kg^{-1}; 施肥深度 180~200 cm, 0~200 cm 土层根际土壤有机质含量较高, 介于 5.55~7.14 g·kg^{-1}; 施肥深度小于 100 cm 或大于 120 cm, 0~20 cm 土层根际土壤碱性磷酸酶活性和碱解氮含量较高, 分别>0.497 mg(phenol)·g^{-1}(soil)·24h^{-1} 和>25.4 mg·kg^{-1}。4)相关分析表明, 在生土地上, 不同施肥深度处理下, 玉米根重、根系 NPK 营养、根际土壤酶活性及根际土壤 NPK 营养密切相关。5)根据 FACTOR 过程和 CLUSTER 聚类分析, 优化得出改良黄土母质生土地玉米冠–根–土系统的适合施肥深度范围为 60~160 cm。本研究结果为通过施肥加快生土熟化提供了新的思路。

关键词 施肥深度 生土地 玉米 地上部生产力 根系分布 根际土壤肥力
中图分类号: S506; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)02-0142-12

Effect of fertilization depth on maize root and rhizosphere soil fertility vertical distribution in immature loess subsoil*

SU Zhifeng[1], YANG Wenping[2], DU Tianqing[1], HAO Jiaomin[3], SUN Min[1], GAO Zhiqiang[1], YANG Zhenping[1**]

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. College of Life Sciences, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, China; 3. College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract This study was set up to determine the effect of fertilization depth on maize (*Zea mays* L.) productivity, root growth

* 国家科技支撑计划课题(2015BAD23B04-2)、国家自然科学基金项目(31101113)和国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-03-01-24)资助
** 通讯作者: 杨珍平, 主要从事作物生态与旱作农业研究。E-mail: yangzp.2@163.com
苏志峰, 研究方向为作物生态与旱作农业研究。E-mail: szf8766@163.com
收稿日期: 2015−07−08 接受日期: 2015−11−03

* This work was supported by the National Key Technology R & D Program (No. 2015BAD23B04-2), the National Natural Science Foundation of China (No. 31101113) and the Special Fund for the Industrial Technology System Construction of Modem Agriculture (No. CARS-03-01-24).
** Corresponding author, E-mail: yangzp.2@163.com
Received Jul. 8, 2015; accepted Nov. 3, 2015

and rhizosphere soil fertility in immature loess subsoil. To that end, a sample of immature loess subsoil was analyzed for the effect of different fertilization depths (0–20 cm, 60–80 cm, 100–120 cm, 140–160 cm and 180–200 cm) of bio-organic fertilizer on maize productivity and the vertical distribution of root weight, rhizospheric soil enzyme activity and rhizosphere soil nutrients in a 2-year root-tube soil column culture. The control treatment (CK) was not treated with fertilizer. The results showed that: 1) indicators such as maize productivity, total root weight, etc., increased at the start and then decreased with increasing fertilization depth from 0 cm to 200 cm. The largest root weight (52.3 g) and productivity (361.0 g) of maize were obtained under the 100–120 cm fertilization depth. 2) In all the treatments, the vertical distribution of maize root weight followed a T-shape and the largest maize root weight was noted in the 0–20 cm soil layer, which accounted for up about 50% of the total root weight. Root weight significantly declined with increasing soil depth (P < 0.05). Under 100–120 cm fertilization depth treatment, both total root weight and root weight of 0–40 cm soil layer (27.19 g) reached the highest level, furthermore, N, P and K accumulation in the root were moderate with 6.60 $g\cdot kg^{-1}$, 2.38 $g\cdot kg^{-1}$ and 8.16 $g\cdot kg^{-1}$, respectively. 3) Fertilization significantly increased enzymes activities and nutrients contents in rhizospheric soil. Urease activity in 0–200 cm rhizospheric soil increased [0.108–0.354 $mg(NH_3\text{-}N)\cdot g^{-1}(soil)\cdot 24h^{-1}$] in the 60–80 cm fertilization depth treatment. In the 140–160 cm fertilization depth treatment, sucrase activity and available phosphorus content of 0–200 cm rhizospheric soil increased to 12.9–19.6 $mg(glucose)\cdot g^{-1}(soil)\cdot 24h^{-1}$ and 4.31–6.02 $mg\cdot kg^{-1}$, respectively. Maize rhizosphere soil organic matter content was higher (5.55–7.14 $g\cdot kg^{-1}$) in the 180–200 cm fertilization depth treatment. When fertilization depth was less than 100 cm or deeper than 120 cm, maize rhizospheric soil alkline phosphatase activity and available nitrogen content kept higher level, which were more than 0.497 $mg(phenol)\cdot g^{-1}(soil)\cdot 24h^{-1}$ and 25.4 $mg\cdot kg^{-1}$, respectively. 4) Significant correlations among root weight, root NPK nutrient, three rhizospheric soil enzyme activities and three rhizospheric soil nutrients under different fertilization depth treatments were observed in the immature loess subsoil. 5) The optimized fertilization depth was 60–160 cm for improving maize shoot-root-soil systems in the immature loess subsoil based on FACTOR and CLUSTER analyses. This study provided a new idea for speeding up the raw soil maturation process through changing fertilizers application depth.

Keywords Fertilization depth; Immature loess subsoil; Maize; Productivity; Root distribution; Rhizosphere soil fertility

黄土高原地区水土流失严重，地表耕作层较薄，养分含量较低。随着农业集约化治理，位于耕作层之下的黄土母质生土不可避免地被外翻至地表，从而影响所种植作物的产量。施肥是提高作物产量、改良土壤肥力的最基本的物化技术措施[1–2]。如何在黄土母质生土地环境中解决施肥与产量的关系，并通过作物本身进行生土熟化，是黄土高原地区农业生产上重要的研究课题。研究表明，有机肥因其含有作物生长发育必需的多种营养元素，蕴含着大量生物活性物质，既可以为植株提供养分，促进其生长，又能改善土壤环境[3–4]。长期施用有机肥与化肥均表现出持续提高作物产量、提高土壤有机碳和氮含量的良好效果，但当产量提高到一定水平后，继续高量施肥无助于作物产量的提高；继续提高有机肥用量有助于土壤有机碳、氮的积累，而继续提高化肥用量无助于土壤有机碳、氮的积累[5]。施肥可有效提高砂姜黑土养分含量，其中有机肥对有机质、全氮及速效钾含量的提高作用较强，而化肥对有效磷含量提高作用较强[6]。长期施肥尤其施用有机肥，能显著提高黑土表层和亚表层土壤有机碳、氮活性[7]；显著提高砂姜黑土脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性，但对酸性磷酸酶和中性磷酸酶活性无明显促进作用[8]；显著增加红壤水稻土 1~3 mm 和 0.25~1 mm 团聚体含量，且增加的新碳主要向 1~3 mm 和 0.25~1 mm 团聚体富集[9]；显著降低 0~20 cm 土层土壤容重，提高该土层的有机碳储量[10]；显著提高土壤微生物量碳、氮含量及微生物碳源利用率及土壤呼吸量[11–12]；且有助于农田动物(线虫、蚯蚓和甲螨)的生存和发展[13]。有机肥替代化肥不仅不会导致北疆绿洲滴灌棉田减产，而且对提高土壤酶活性、调节土壤细菌、真菌、放线菌群落组成结构，改善土壤生物学性状有显著作用[14]。持续的有机肥施用是保持或提高土壤有机碳水平和土壤碳库管理指数、提升土壤肥力和养分供应能力的必要措施[15–16]。本团队的前期研究结果也表明，有机肥对改良黄土母质生土地并在当年获得谷子最佳产量具有立竿见影的效果[4]，健壮的作物根系(如玉米)有利于提高生土肥力[17]。

玉米(*Zea mays*)在国内外工农业生产中占有重要的地位，是重要的工业原料、优良的饲料及优质的经济作物，也是黄土高原常见作物。有关施肥种类、施肥量、施肥时期对玉米产量、根系生长及土壤肥力形成影响的研究报道较多[18–28]，且施肥深度多为撒施在表层或沟施在 20 cm 耕层，以沟施在

20 cm 耕层较撒施在表层有利于减少肥料的无效损失、提高肥料利用率。那么，是否 20 cm 耕层就是获得最大作物产量及最高土壤肥力的合理施肥深度呢？本研究团队拟在前期研究基础上，以玉米为供试作物，贝特牌生物有机肥(一种鸡粪发酵肥)为供试肥料，通过模拟生土地环境条件，研究施肥深度对玉米根系及根际土壤酶活性和根际土壤养分含量的影响，探讨改良黄土母质生土地土壤肥力并获得最大玉米产量的合理施肥深度，为生土改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及试验材料

试验于 2012 年 4 月—2013 年 12 月连续 2 年在山西农业大学黄土高原作物研究所内进行。试验区坐落于山西省太谷县境内，属山西省中部的晋中盆地，东经 112°35′，北纬 37°25′，平均海拔 800 m，暖温带大陆性气候，年平均气温 9.8 ℃，年降雨量 456 mm，年日照时数 2 600 h，≥10 ℃年积温为 3 520 ℃，无霜期 176 d，光热资源充足[29]。常年表现为春季干旱多风，夏季酷暑炎热，秋季集中降雨，冬季寒冷少雪。从当年 12 月 1 日至翌年 3 月 5 日(惊蛰前后)月平均气温–4.5 ℃左右。主要种植作物有冬小麦、春玉米、春大豆、甘蓝等，一年 1 熟制。土壤类型为黄土母质上发育而成的石灰性褐土。

供试玉米品种为‘纪元 1 号’，优质、丰产、抗病、中早熟，包衣种子由山西省应县种子公司提供。供试土壤为黄土母质上发育而成的石灰性褐土，取自山西农业大学试验农场改苗建工地的距地表 3 m 以下的母质生土。风干，过筛，充分混匀。母质生土养分含量为：全氮 0.19 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮 19.84 $mg\cdot kg^{-1}$，速效磷 2.98 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾 30.32 $mg\cdot kg^{-1}$，有机质 1.17 $g\cdot kg^{-1}$，pH 8.0。母质生土脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性分别为 0.29 $mg\cdot g^{-1}$(土)$\cdot 24h^{-1}$、1.27 $mg\cdot g^{-1}$(土)$\cdot 24h^{-1}$、0.71 $mg\cdot g^{-1}$(土)$\cdot 24h^{-1}$。

1.2 研究方法与试验设计

根管土柱法。根管为特制的 25 cm×200 cm($\Phi\times h$)的硬质 PE 塑料根管，管壁厚度 1 cm。将根管垂直等分锯成两段，每段的两端及中部均装有可相互连接与固定的钢板、铁环，以便将根管两段合拢固定。整合固定后，垂直立于根室内，向下的一端用厚塑料封口。

将供试生土分层装入根管，每层 20 cm，每层土重约 10 kg。依试验设计将施肥层次的生土与肥料充分混匀后装管。试验设 5 个施肥深度：0~20 cm、60~80 cm、100~120 cm、140~160 cm、180~200 cm，肥料均为贝特牌生物有机肥(一种鸡粪发酵肥，其有机质含量≥45%，$N+P_2O_5+K_2O$ 含量≥5%，18 $g\cdot$管$^{-1}$，约合 3 200 $kg\cdot hm^{-2}$)，以不施肥为对照(CK)。重复 3 次。2012 年 4 月 20 日播种。播前将根管浇足水，每管种 3 粒玉米种子。玉米出苗后每管留健壮苗 1 株，定期浇水。

取样方法：玉米成熟期时将根管取出，先将地上部分收获，分别测茎秆干重、籽粒总重及百粒重。然后将根管打开，按 0~20 cm、20~40 cm、40~80 cm、80~120 cm、120~160 cm、160~200 cm 的顺序，用灭菌牙签小心获取各层的根际土样，装入灭菌塑料袋，用于土壤酶及土壤养分含量测定。取土后，将余下的土柱用水冲洗，直到露出完整根系，晾干，拍照，然后按取土样的顺序依次分段，分别称重，粉碎，装袋，留作根系 NPK 营养含量测定。

2013 年进行上述试验的重复性试验。

1.3 指标测定方法

根重、地上部重的测定采用直接风干称重法。

根系 NPK 养分含量测定：采用植株 NPK 联合测定法[30]。将根系样品经 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，全氮测定采用半微量凯氏定氮法，全磷测定采用钒钼黄比色法，全钾测定采用火焰光度计法。

土壤酶活性测定：将风干土样按各种酶测定的要求过筛，脲酶(urease)按靛酚比色法测定[31]，碱性磷酸酶(alkaline phosphatase)按磷酸苯二钠比色法测定[31]，蔗糖酶(sucrase)按 3,5-二硝基水杨酸比色法测定[32]。

土壤营养测定：将风干土样按各种营养测定的要求过筛，土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法–外加热法[33]，土壤速效氮测定采用碱解扩散法[33]，速效磷测定采用 0.5 $mol\cdot L^{-1}$ $NaHCO_3$ 浸提–钼锑抗比色法[33]。

1.4 数据整理与统计分析

本文数据皆为 2012 年度的试验结果。采用 Microsoft Excel 软件进行数据整理，Sigma plot 10.0 软件进行绘图分析。用 SAS 9.1.3 统计分析软件的 ANOVA 过程进行方差分析与多重比较，CORR 过程进行相关分析，FACTOR 过程进行主要因子分析，并作最短距离聚类分析。结果用平均值±标准误来表示。

2 结果与分析

2.1 施肥深度对玉米地上部生产力的影响

施肥深度对玉米总根重及地上部生产力的影响

见表 1。在 0~200 cm 土层范围内，随施肥深度的加深，玉米地上部茎秆干重、总粒重、百粒重、总根重等所测指标总体均呈先增加后减少的规律，且除总粒重和地上部总干重外，其余指标均差异显著(P<0.05)。各项测定指标中，受施肥深度影响最大的是根重(CV=25.4%)，影响最小的是总粒重(CV=4.9%)。比较而言，在生土地上，以施肥深度在 100~120 cm 处的玉米根重及地上部生产力最大。表 1 还表明，根系生长越好，越有利于地上部生产力的提高。因此，在生土地上，以调控根系生长的措施来达到提高地上部生产力的目的是可行的。此外，本试验中，施肥深度在耕层 0~20 cm 处玉米各项指标均不及不施肥的 CK 处理或者二者差异不显著。

2.2　施肥深度对玉米根重垂直分布的影响

0~200 cm 土层内不同施肥深度对玉米根重垂直分布的影响见表 2 和表 3。

表 1　不同施肥深度对生土地玉米总根重及地上部生产力的影响

Table 1　Effects of fertilization depths on total root weight and productivity of maize in the loess subsoil

施肥深度 Fertilization depth (cm)	茎秆干重 Dry weight of stem (g)	总粒重 Total grain weight (g)	百粒重 100-grain weight (g)	地上部总干重 Dry weight of shoot (g)	根干重 Dry weight of root (g)	根冠比 Root weight/ shoot weight
0~20	97.1±10.2ab	225.2±29.0a	41.4±1.9d	322.3±19.1a	26.8±6.6b	0.08±0.02b
60~80	79.8±10.3b	230.0±24.2a	50.0±1.7b	309.9±29.3a	28.2±4.7b	0.09±0.01ab
100~120	117.1±29.9ab	244.0±35.2a	54.9±2.6a	361.0±44.9a	52.3±5.8a	0.15±0.02a
140~160	132.0±10.8a	221.4±10.9a	50.9±1.6b	353.4±21.7a	38.3±10.6ab	0.11±0.04ab
180~200	85.7±10.7b	217.9±19.8a	45.7±1.1c	303.6±24.4a	36.0±5.2ab	0.12±0.02ab
CK	95.2±25.5ab	212.1±8.8a	45.5±2.3c	307.3±17.3a	34.9±15.1ab	0.11±0.05ab
平均 Average	101.1	225.1	48.1	326.2	36.1	0.11
CV (%)	19.5	4.9	10.0	7.6	25.4	20.0

同列不同小写字母表示同一指标不同施肥深度间差异显著(P<0.05)。Different lowercases in the same column indicate significant difference at 0.05 level among different fertilization depths of the same index.

表 2　不同施肥深度下不同土层玉米根重的垂直分布

Table 2　Vertical distributions of maize root weight in different soil layers under different fertilization depths

根层 Root layer (cm)	根重 Root weight (g) 施肥深度 Fertilization depth (cm) 0~20	60~80	100~120	140~160	180~200	CK	平均 Mean	CV (%)
0~20	12.48±2.54ABa	10.74±4.67Ba	20.73±2.17ABa	18.24±6.31ABa	25.53±6.21Aa	21.57±11.24ABa	18.22±5.65	31.04
20~40	2.42±1.04Bb	3.62±2.79ABbc	6.46±2.90Abc	5.63±0.16Ab	1.99±0.09Bb	2.03±0.42Bb	3.69±1.93	52.42
40~80	4.35±2.52ABCb	6.30±2.06ABab	7.11±1.68Abc	5.41±1.41ABCb	2.47±0.23Cb	3.57±1.00BCb	4.87±1.74	35.67
80~120	3.05±0.73Bb	4.55±2.54Bbc	8.82±2.63Aab	5.50±1.09Bb	2.21±0.45Bb	2.92±1.52Bb	4.51±2.43	53.89
120~160	2.33±1.01ABb	2.13±0.77ABbc	3.06±0.40Ac	1.46±0.45Bb	1.57±0.47Bb	2.12±0.63ABb	2.11±0.58	27.35
160~200	2.14±0.05Bb	0.84±0.35Bc	6.14±3.28Abc	2.01±1.77Bb	2.25±0.37Bb	2.67±0.76Bb	2.67±1.80	67.52
合计 Total	26.77±6.58	28.19±4.67	52.32±5.79	38.25±10.35	36.01±5.24	34.87±15.06		
CV (%)	89.87	74.82	70.80	95.76	159.46	133.20		

同行不同大写字母表示同一根层不同施肥深度间差异显著(P<0.05)；同列不同小写字母表示同一施肥深度不同根层间差异显著(P<0.05)。下同。Different capital letters in the same line indicate significant differences at 0.05 level among different fertilization depths of the same root layer. Different lowercases in the same column indicate significant differences at 0.05 level among different root layers of the same fertilization depth. The same below.

表 3　不同施肥深度下不同土层玉米根重占总根重的比例

Table 3　Percentages of maize root weight in different soil layers to total root weight under different fertilization depths　%

根层 Root layer (cm)	施肥深度 Fertilization depth (cm) 0~20	60~80	100~120	140~160	180~200	CK	平均 Mean	CV
0~20	46.61	38.11	39.62	47.69	70.89	61.86	50.80	25.50
20~40	9.03	12.85	12.35	14.72	5.52	5.82	10.05	38.40
40~80	16.26	22.35	13.59	14.14	6.86	10.23	13.90	38.08
80~120	11.40	16.14	16.85	14.39	6.13	8.37	12.21	35.54
120~160	8.70	7.56	5.85	3.82	4.37	6.07	6.06	30.56
160~200	7.99	2.98	11.74	5.25	6.24	7.65	6.97	42.37

由表 2 可以看出，所有施肥深度的根重垂直分布均符合“T”型分布，以 0~20 cm 处根重最大，占总根重的 50%左右(表 3)，之后随根系下延，根重明显递减(P<0.05)；同一施肥深度下，在 0~200 cm 的根层范围内，根重垂直分布变异幅度较大，达 70.80%~159.46%，其中以施在 180~200 cm 处的变异系数最大，其次是不施肥的 CK 处理，变异系数最小的是 100~120 cm 的施肥深度。总体而言，在 0~160 cm 的根层范围内，施肥明显降低了根重垂直分布的差异，且随施肥深度增加，根重变异系数呈先降低后增大的趋势。

同一根层内，因施肥深度带来的根重差异亦达 27.35%~67.52%；总体而言，随施肥深度加深，各层根重尤其 0~160 cm 根层内的根重均呈先增加后减少的趋势；但与对照不施肥处理相比，施肥在 0~80 cm 处，总根重及 0~20 cm 处根重均明显降低；若以总根重和 0~20 cm 处根重为选择指标，则施肥深度在 100~120 cm 处有利于根系生长、根重增加。

从表 2 和表 3 还可以看出，与对照不施肥处理比较，随施肥深度由 0~20 cm 加深到 140~160 cm，中下层根重及根重比例明显增加，符合根系具有趋肥性的特点。综合可得：玉米根系生长的最适施肥深度为 100~120 cm。

2.3　施肥深度对玉米根系 NPK 含量垂直分布的影响

表 4 为不同施肥深度下玉米根系 NPK 含量垂直分布结果。同一施肥深度下，随根层加深，根系 NPK 含量垂直分布差异显著(P<0.05)(CK 和施肥深度 180~200 cm 的根系全 N 含量除外，其差异不显著)，其中根系全 N 含量变异系数为 8.41%~30.76%，根系全 P 含量变异系数为 20.16%~46.43%，根系全 K 含量变异系数为 20.37%~45.62%；不同根层间，以 P、K 的变异更大。在同一根层内，因施肥深度带来的根系 NPK 含量差异亦较大，三者的变异系数分别为 7.61%~21.91%、26.00%~58.38%和 12.75%~43.84%；不同施肥深度间，同样以 P、K 的变异更大。具体而言，N 营养因施肥深度带来的差异未达 0.05 水平显

表 **4**　不同施肥深度下不同土层玉米根系 **NPK** 含量的垂直分布

Table 4　Vertical distributions of maize root N, P, K contents in different soil layers under different fertilization depths

指标 Index	根层 Root layer (cm)	施肥深度 Fertilization depth (cm)						平均 Mean	*CV* (%)
		0~20	60~80	100~120	140~160	180~200	CK		
全氮 Total N (g·kg^{-1})	0~20	2.96±0.10Bc	4.41±0.88ABb	4.67±0.36ABc	4.88±1.03ABb	6.09±2.12Aa	4.46±0.71ABa	4.58±1.00	21.91
	20~40	7.21±0.84Ab	6.30±1.97Aab	6.21±0.95Abc	6.41±0.91Aab	7.67±1.19Aa	7.77±1.77Aa	6.93±0.71	10.23
	40~80	9.23±0.92Aa	6.83±1.92BCa	5.82±0.93Cbc	5.46±1.28Cb	7.53±0.99ABCa	8.82±1.13ABa	7.28±1.54	21.19
	80~120	7.55±0.20Ab	6.62±0.69Aab	6.45±1.23Abc	6.93±0.96Aab	7.35±0.73Aa	7.98±2.03Aa	7.15±0.58	8.18
	120~160	8.58±0.31Aa	7.14±0.87ABa	7.73±0.71ABab	6.09±1.99Bab	7.56±0.63ABa	8.51±1.58Aa	7.60±0.93	12.19
	160~200	7.27±0.18Ab	7.14±2.03Aa	8.74±1.63Aa	8.14±1.47Aa	7.72±0.98Aa	7.62±1.52Aa	7.77±0.59	7.61
	平均 Mean	7.13±2.19	6.41±1.03	6.60±1.44	6.32±1.14	7.32±0.62	7.53±1.57		
	CV (%)	30.76	16.06	21.79	18.11	8.41	20.83		
全磷 Total P (g·kg^{-1})	0~20	0.86±0.16Bc	1.27±0.28Bb	1.33±0.20Bc	1.16±0.15Bb	1.64±0.13Bb	3.49±1.58Aab	1.62±0.95	58.38
	20~40	2.49±0.15ABa	1.78±0.29Bab	2.23±0.53Bb	1.61±0.26Bab	1.92±0.63Bb	4.35±2.29Aab	2.40±1.01	42.11
	40~80	1.53±0.21Ab	3.27±1.84Aa	2.25±0.11Ab	1.80±1.00Aab	3.13±2.55Aab	4.26±2.11Aab	2.71±1.03	38.12
	80~120	2.53±0.33ABa	1.74±0.15Bab	3.67±0.34ABa	1.67±0.17Bab	4.06±2.18Aab	2.68±1.35ABb	2.72±0.98	35.94
	120~160	1.83±0.08Bb	2.25±0.48Bab	2.11±0.17Bb	1.84±0.39Bab	6.02±2.23Aa	4.80±1.48Aa	3.14±1.81	57.58
	160~200	2.45±0.12Aa	2.17±0.52Aab	2.69±0.32Ab	2.26±0.37Aa	4.02±1.62Aab	3.45±1.21Aab	2.84±0.74	26.00
	平均 Mean	1.95±0.67	2.08±0.68	2.38±0.77	1.72±0.36	3.46±1.62	3.84±0.77		
	CV (%)	34.57	32.68	32.45	20.72	46.63	20.16		
全钾 Total K (g·kg^{-1})	0~20	7.60±1.95Cab	21.27±1.99Aa	12.64±1.31BCa	13.18±4.17BCa	15.04±1.86ABa	13.82±2.71BCa	13.92±4.41	31.68
	20~40	5.46±0.04Cc	9.54±0.92ABb	7.47±3.43ABCab	8.00±0.74ABCab	10.10±2.22Ab	6.46±0.64BCb	7.84±1.77	22.64
	40~80	5.60±0.74Bc	8.40±1.06ABb	8.47±1.49ABab	10.02±4.18Aab	7.03±1.34ABb	5.73±1.06ABb	7.54±1.73	23.00
	80~120	1.19±0.16Cd	10.18±3.09Ab	8.52±0.85ABab	9.62±0.64ABab	7.27±1.22Bb	7.59±0.37ABb	7.40±3.24	43.84
	120~160	6.49±0.19Bbc	8.97±0.14Ab	9.15±1.92Aab	7.59±2.09ABb	7.35±0.61ABb	7.92±0.97ABb	7.91±1.01	12.75
	160~200	8.42±0.64Aa	8.08±3.35Ab	2.72±0.14Ab	10.34±0.49Aab	8.97±0.98Ab	8.03±0.19Ab	7.76±2.61	33.69
	平均 Mean	5.79±2.53	11.07±5.05	8.16±3.21	9.79±1.99	9.29±3.06	8.26±2.87		
	CV (%)	43.69	45.62	39.29	20.37	32.91	34.75		

著性(P>0.05)的根层是 20~40 cm、80~120 cm 和 160~200 cm，P 营养差异未达 0.05 水平显著性(P>0.05)的根层是 40~80 cm 和 160~200 cm，K 营养差异仅 160~200 cm 根层未达 0.05 水平显著性(P>0.05)。因此，单就 0~20 cm 根层而言，与不施肥 CK 处理比较，施肥明显降低了根系 P 营养的积累；随施肥深度加深，同一根层内，根系 N、P 积累呈增加趋势，根系 K 积累呈先明显增加后急剧降低的趋势。本试验中，6 个施肥深度处理均以 20 cm 以下根系的 N、P 含量高于耕层根系，而根系 K 含量则以 0~20 cm 耕层根系最高，可能原因是 0~20 cm 耕层有较多起支持作用的支柱根，而承担吸收水分营养的根系主要分布在 20 cm 以下。结合总根重及地上部生产力可知，根系 NPK 养分积累过高或过低，均不能获得最大生产力与最大根重。

2.4　施肥深度对玉米根际土壤酶活性垂直分布的影响

不同施肥深度下玉米根际土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性的测定结果如表 5 所示。供试生土本底土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性分别为 0.058 [mg(NH_3-N)·g^{-1}(土)·$24h^{-1}$]、0.270 [mg(phenol)·g^{-1}(土)·$24h^{-1}$]和 7.2 [mg(glucose)·g^{-1}(土)·$24h^{-1}$]。从表 5 看出：1)所有施肥处理的耕层 0~20 cm 处脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性均明显高于本底土壤相应指标(P<0.05)；2)施肥深度在 0~160 cm 土层内的 4 个处理，其各土层的脲酶活性均明显高于对照不施肥处理 CK 和 180~200 cm 的施肥处理(P<0.05)；3)无论施肥与否，无论施肥深度如何，所有处理均以 0~20 cm 土层根际土壤酶活性占绝对优势(施肥深度 100~120 cm 的蔗糖酶活性除外)；4)施肥土层的根际土壤脲酶和碱性磷酸酶活性明显高于其临近土层，这一现象与根重分布类似，说明施肥能够极大地影响作物根系生长，进而影响根际土壤酶活性；5)比较 5 种施肥深度，发现施肥深度 60~80 cm 较其他深度更有利于提高生土地玉米各土层根际土壤脲酶活性，其次为施肥深度 140~160 cm、0~20 cm；施肥深度 140~160 cm 较其他深度更有利于提高生土地玉米各土层根际土壤蔗糖酶的活性，其次为施肥深度 0~20 cm；以 100~120 cm 为中界，提高或降低施肥深度，均有利于提高 0~20 cm 土层根际土壤碱性磷酸酶活性，其余土层表现不一；6)同一土层，因施肥深度引起的根际土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活

表 5　不同施肥深度下不同土层玉米根际土壤酶活性垂直分布

Table 5　Vertical distributions of maize rhizospheric soil enzyme activities in different soil layers under different fertilization depths

指标 Index	土层 Soil layer (cm)	施肥深度 Fertilization depth (cm)						CV (%)
		0~20	60~80	100~120	140~160	180~200	CK	
脲酶 Urease [mg(NH_3-N)·g^{-1} (soil)·$24h^{-1}$]	0~20	0.193±0.023Ba	0.354±0.032Aa	0.089±0.016Ca	0.208±0.012Ba	0.052±0.002Ca	0.088±0.006Ca	68.3
	20~40	0.139±0.010Ab	0.138±0.014Ab	0.098±0.013Ba	0.121±0.010ABc	0.007±0.006Cb	0.028±0.009Cb	64.9
	40~80	0.109±0.022Bb	0.154±0.020Ab	0.095±0.009Ba	0.118±0.030ABc	0.025±0.012Cb	0.025±0.007Cb	59.8
	80~120	0.113±0.035Ab	0.125±0.011Ab	0.120±0.025Aa	0.137±0.031Ac	0.016±0.003Bb	0.026±0.007Bb	59.8
	120~160	0.135±0.019Bb	0.136±0.015Bb	0.113±0.017Ba	0.172±0.010Ab	0.017±0.003Cb	0.030±0.016Cb	62.3
	160~200	0.128±0.046Ab	0.108±0.025Ab	0.125±0.016Aa	0.130±0.020Ac	0.017±0.019Bb	0.025±0.008Bb	60.0
	CV (%)	22.2	54.4	13.6	24.1	71.0	67.0	
碱性磷酸酶 Alkline phosphatase [mg(phenol)·g^{-1} (soil)·$24h^{-1}$]	0~20	0.672±0.073Aa	0.583±0.031Ba	0.497±0.022Ca	0.580±0.039Ba	0.646±0.031ABa	0.457±0.036Ca	14.5
	20~40	0.258±0.054ABb	0.198±0.072Bd	0.309±0.029ABbc	0.357±0.019Ab	0.286±0.069ABbc	0.324±0.092ABb	19.2
	40~80	0.357±0.185Ab	0.396±0.026Ab	0.312±0.020Abc	0.297±0.050Abc	0.275±0.009Ac	0.303±0.077Abc	13.8
	80~120	0.255±0.006Cb	0.318±0.029Bc	0.444±0.053Aa	0.241±0.031Cc	0.244±0.019Cc	0.238±0.018Cbc	28.1
	120~160	0.227±0.015Cb	0.303±0.026ABCc	0.337±0.028ABb	0.367±0.055Ab	0.285±0.045ABCbc	0.272±0.062BCbc	16.6
	160~200	0.236±0.022BCb	0.257±0.019BCcd	0.264±0.025BCc	0.271±0.022Bc	0.361±0.019Ab	0.224±0.015Cc	18.0
	CV (%)	51.5	39.4	25.0	34.6	43.1	27.8	
蔗糖酶 Sucrase [mg(glucose)·g^{-1} (soil) ·$24h^{-1}$]	0~20	13.3±1.7ABa	13.6±4.2ABa	9.7±2.1Bab	19.6±1.3Aa	9.9±8.5Ba	7.0±1.4Ba	35.9
	20~40	8.2±0.3ABc	7.9±0.2Bb	8.3±2.0ABab	12.9±1.8Ab	6.5±4.8Bb	5.7±2.2Ba	30.6
	40~80	10.1±1.1Bbc	6.8±0.6Bb	7.5±1.4Bb	16.0±5.1Aab	6.2±3.9Bb	5.7±2.8Ba	44.5
	80~120	10.5±1.1ABabc	9.5±1.1ABb	7.4±1.2Bb	15.3±5.0Aab	7.5±4.8Bab	6.4±3.6Ba	34.2
	120~160	11.4±1.4ABab	7.6±0.5Bb	11.3±4.7ABa	17.0±4.8Aab	6.5±4.5Bb	6.2±3.7Ba	41.2
	160~200	13.2±3.0ABa	7.7±0.2BCb	9.6±2.5BCab	16.5±1.9Aab	6.6±4.2Cb	6.3±3.7Ca	41.0
	CV (%)	17.6	28.2	17.1	13.4	19.7	7.8	

性的差异分别达 60%、20%、40%左右；同一施肥深度，因土层分布引起的根际土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性的差异分别为 13.6%~71.0%、25.0%~51.5%、7.8%~28.2%，绝大多数施肥深度处理降低了不同土层之间脲酶活性的差异，但增加了碱性磷酸酶和蔗糖酶活性的差异。

总体而言，与 CK 比较，除施肥深度 180~200 cm 的脲酶活性略低于 CK 且差异不显著(P<0.05)外，其余施肥深度均明显提高了根际土壤 3 种酶活性。若以脲酶指标优选，施肥深度 60~80 cm 最佳；若以蔗糖酶指标优选，施肥深度 140~160 cm 最佳。

2.5 施肥深度对玉米根际土壤营养垂直分布的影响

不同施肥深度下玉米根际土壤碱解氮、速效磷和有机质含量的测定结果见表 6。供试生土的碱解氮、速效磷和有机质含量分别为 10.0 mg·kg^{-1}、1.56 mg·kg^{-1}和 2.93 g·kg^{-1}。分析发现：1)所有施肥处理各土层根际土壤 3 类营养均明显高于本底土壤；2)所有施肥处理的 0~20 cm 土层根际土壤碱解氮含量均显著高于对照不施肥处理 CK(P<0.05)；除个别土层外，所有施肥处理的各土层根际土壤速效磷和有机质含量均显著高于对照不施肥处理 CK(P<0.05)；3)在不施肥情况下，根际土壤 3 类营养总体呈递减趋势；而施肥改变了这种趋势，施肥明显提高了施肥土层或其临近土层 3 类土壤营养含量；4)就碱解氮含量而言，施肥深度以 100~120 cm 为中界，提高或降低施肥深度，均有利于提高 0~20 cm 根际土壤碱解氮含量，但与 CK 相比，20 cm 以下土层碱解氮含量没有明显优势；就速效磷含量而言，5 种施肥深度均明显提高了各土层的速效磷含量，以施肥深度 140~160 cm 效果较好；就有机质含量而言，5 种施肥深度均明显提高了各土层的有机质含量，以施肥深度 180~200 cm 较好；5)平均来看，同一土层，因施肥深度引起的差异为碱解氮>速效磷>有机质；同一施肥深度，因土层分布引起的差异大体上为碱解氮>速效磷>有机质；施肥深度的差异大于土层间的差异。

综上所述，生土地上，施用有机肥有利于促进玉米根系生长，在有机肥及玉米根系的双重作用下，有利于提高根际土壤速效磷及有机质含量。

表 6 不同施肥深度下不同土层玉米根际土壤养分含量垂直分布

Table 6 Vertical distributions of maize rhizospheric soil nutrients in different soil layers under different fertilization depths

指标 Index	土层 Soil layer (cm)	施肥深度 Fertilization depth (cm)						平均 Mean	CV (%)
		0~20	60~80	100~120	140~160	180~200	CK		
碱解氮 Available nitrogen (mg·kg^{-1})	0~20	72.6±2.63Aa	30.6±0.88Ca	25.4±0.52Db	30.6±0.52Ca	37.1±0.35Bd	23.5±0.70Ed	36.6±18.3	49.9
	20~40	42.5±0.87Bb	16.3±1.22Ed	26.1±1.58Cb	18.2±0.70De	42.0±1.75Bc	66.5±1.40Aa	35.3±19.0	54.0
	40~80	16.1±0.35Df	25.9±1.40Bb	25.9±1.40Bb	15.2±1.23Df	20.7±2.10Cf	38.2±1.05Ab	23.7±8.5	35.7
	80~120	30.3±2.27Cd	31.2±1.40Ba	29.1±1.05Da	25.7±1.22Ec	34.7±1.40Ae	31.7±1.93Bc	30.4±3.0	9.7
	120~160	40.8±0.88Bc	21.5±1.58Ec	22.2±1.22Ed	28.7±1.05Db	49.2±1.93Ab	30.8±2.80Cc	32.2±10.9	33.7
	160~200	21.9±1.23De	12.8±0.52Ee	23.5±0.70Cc	21.7±0.70Dd	53.7±1.22Aa	24.3±1.57Bd	26.3±14.1	53.4
	平均 Mean	37.4±20.1	23.0±7.5	25.3±2.4	23.4±6.0	39.6±11.7	35.8±16.0		
	CV (%)	53.8	32.8	9.3	25.9	29.6	44.6		
速效磷 Available phosphorus (mg·kg^{-1})	0~20	6.39±0.36Aa	3.25±0.20Dcd	6.11±0.36Bb	6.02±0.27Ba	3.50±0.38Cb	2.99±0.23Ea	4.7±1.6	34.3
	20~40	5.40±0.16Bb	4.76±0.09Cb	6.73±0.02Aa	4.41±0.29Dcd	3.73±0.22Eb	2.60±0.02Fab	4.6±1.4	30.7
	40~80	4.02±0.47Bd	2.94±0.18Cd	2.83±0.32CDe	4.88±0.25Ac	2.36±0.43Ec	2.63±0.38Db	3.3±1.0	29.5
	80~120	4.70±0.50Bc	7.81±0.09Aa	4.43±0.27Bc	4.31±0.04Bd	3.61±0.34Cb	2.05±0.22Dc	4.5±1.9	42.1
	120~160	2.87±0.18Fe	4.81±0.43Bb	3.77±0.25Dd	5.93±0.47Aab	3.41±0.04Eb	2.08±0.50Cc	3.8±1.4	36.2
	160~200	3.70±0.22Bd	3.55±0.07Bc	3.88±0.07Bd	5.49±0.29Ab	4.45±0.22Ca	1.52±0.34Dd	3.8±1.3	34.8
	平均 Mean	4.5±1.3	4.5±1.8	4.6±1.5	5.2±0.7	3.5±0.7	2.3±0.5		
	CV (%)	28.0	39.6	32.4	14.4	19.2	22.9		
有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	0~20	5.73±0.69Aa	5.19±0.15ABb	4.66±0.60Bb	5.92±0.11Aa	5.95±0.13Ac	4.71±0.44Ba	5.4±0.6	11.0
	20~40	3.96±0.15Cb	5.93±0.15Aa	4.72±0.07Bb	4.23±0.42Cc	5.55±0.29Ad	3.94±0.27Cb	4.7±0.8	17.9
	40~80	5.14±0.34BCa	5.52±0.48ABb	4.56±0.23Cb	5.50±0.21ABa	5.89±0.19Ac	3.82±0.41Dbc	5.1±0.8	15.0
	80~120	5.18±0.60ABa	4.42±0.36BCc	5.77±0.23Aa	3.22±0.64Dd	5.78±0.18Acd	3.74±0.20CDbc	4.7±1.1	22.8
	120~160	4.03±0.02Cb	3.96±0.15Cd	3.68±0.11Dc	4.83±0.04Bb	7.14±0.09Aa	3.45±0.16Ebc	4.5±1.4	30.3
	160~200	4.22±0.09Cb	3.92±0.14Dd	4.56±0.23Bb	4.23±0.17Cc	6.55±0.02Ab	3.20±0.23Ec	4.4±1.1	25.3
	平均 Mean	4.7±0.7	4.8±0.8	4.7±0.7	4.7±1.0	6.1±0.6	3.8±0.5		
	CV (%)	15.6	17.5	14.3	20.9	9.6	13.6		

2.6 玉米根系重量、根系营养、根际土壤酶活性及根际土壤营养之间的相关性分析

对不同施肥深度不同土层的玉米根重、根系氮磷钾营养和根际土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶以及根际土壤碱解氮、速效磷、有机质等10个指标做相关分析，结果如表7所示。玉米根重与根系N、P营养呈显著(P<0.05)或极显著(P<0.001)负相关，而与根系K营养呈极显著(P<0.001)正相关；玉米根重与根际土壤碱性磷酸酶活性亦呈极显著(P<0.001)正相关，这可能与玉米根系分泌磷酸酶有关。

玉米根系 N 营养与 P 营养相互促进，呈极显著(P<0.01)正相关，而与 K 营养呈极显著(P<0.001)负相关；同时，根系 N、P 营养与根际土壤 3 类酶活性均呈显著或极显著负相关，而根系 K 营养则与根际土壤脲酶和碱性磷酸酶活性均达 0.05 水平以上的正相关，与蔗糖酶活性无显著相关性(P>0.05)。另外，根系 N、P 营养与根际土壤速效磷含量也呈极显著(P<0.01)负相关。可见，从酶活性及速效磷的提高角度来看，玉米根系积累 N、P 营养越多，可能分泌的含 N、P 物质越多，从而抑制了土壤酶活性，而积累 K 营养越多，K^+可能作为一种离子泵或酶激活剂，提高了土壤酶活性。

本试验中，玉米根际脲酶活性的提高利于促进其他 2 类酶活性的提高(P<0.01，P<0.001)及根际土壤速效磷含量的增加(P<0.05)；根际土壤碱性磷酸酶活性的提高利于提高根际土壤有机质的含量；根际土壤蔗糖酶活性的提高利于改善根际土壤速效磷的含量。可见，根际土壤 3 类酶活性与根际土壤 3 类营养密切相关。

表 7　不同施肥深度不同土层玉米根系根重、根系营养及根际土壤酶活性、根际土壤营养含量之间的相关系数

Table 7　Correlation coefficients of root weight, root nutrition, rhizospheric soil enzyme activities and rhizospheric soil nutrients of maize in different soil layers under different fertilization depths

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
x_1	1.000 0									
x_2	−0.665 7***	1.000 0								
x_3	−0.333 3*	0.452 8**	1.000 0							
x_4	0.594 1***	−0.595 1***	−0.319 0	1.000 0						
x_5	0.232 7	−0.521 6**	−0.629 8***	0.421 5*	1.000 0					
x_6	0.805 6***	−0.711 9***	−0.349 4*	0.597 9***	0.429 9**	1.000 0				
x_7	0.207 9	−0.372 4*	−0.632 8***	0.279 9	0.655 9***	0.307 7	1.000 0			
x_8	0.028 4	−0.107 4	0.271 3	−0.093 4	−0.166 8	0.308 3	−0.174 5	1.000 0		
x_9	0.184 7	−0.430 5**	−0.516 3**	0.068 3	0.409 6*	0.272 7	0.502 7**	0.027 6	1.000 0	
x_{10}	0.252 0	−0.303 4	0.099 7	0.165 1	0.001 5	0.386 4*	0.005 8	0.241 2	0.201 8	1.000 0

x_1：根重；x_2：根系全氮；x_3：根系全磷；x_4：根系全钾；x_5：土壤脲酶；x_6：土壤磷酸酶；x_7：土壤蔗糖酶；x_8：土壤碱解氮；x_9：土壤速效磷；x_{10}：土壤有机质。下同。*、**和***分别表示 P<0.05、P<0.01 和 P<0.001。x_1: root weight; x_2: root total nitrogen; x_3: root total phosphorus; x_4: root total potassium; x_5: soil urease; x_6: soil alkaline phosphatase; x_7: soil sucrase; x_8: soil available nitrogen; x_9: soil available phosphorus; x_{10}: soil organic matter. The same below. *, ** and *** mean significant difference at 0.05, 0.01 and 0.001 levels, respectively. The same below.

为了进一步分析测定的 10 个根土指标中对根土系统影响较大的主要指标，采用 SAS 9.1.3 的 FACTOR 过程将这 10 个根土指标进行分类(表 8)。结果发现，影响生土地玉米根土系统的主要指标首先是根重、根系 N 营养、根系 K 营养和根际土壤磷酸酶(第 1 因子)，其次是根际土壤脲酶和蔗糖酶(第 2 因子)，根际土壤速效磷含量隶属于第 3 因子。依据因子的主次顺序，并结合所获得的地上部生产力(地上部干重、总粒重、百粒重)，对不同施肥深度的玉米根土–生产力系统进行聚类(图 1)：1)首先将 6 个处理划分为 2 类，0~160 cm 的 4 个施肥深度为第 I 类，180~200 cm 的施肥深度与不施肥对照 CK 为第 II 类；2)将 0~160 cm 的 4 个施肥深度，进一步划分为 3 类，a 类为施肥深度 0~20 cm，b 类为施肥深度 60~80 cm 和 140~160 cm，c 类为施肥深度 100~120 cm。根据聚类结果，本试验选择改良母质生土地玉米根土系统的适合施肥深度为 60~160 cm。

3 结论与讨论

加快生土熟化，促进母质土壤当年生产见效，通过人工施肥调节生土与作物根系互动互作进而使无生机母质土壤变为有生机耕作土壤，是黄土高原半干旱地区可持续发展农业的一项重要研究课题[17]。关于黄土母质生土地“施肥–作物(根系+生产力)–土壤”的关系问题，已有研究主要集中在常规耕层(0~20 cm)施肥对作物生产力和根土肥系统建成的影响上[4,17]。

表 8 影响生土地玉米根土系统的关键因子分析

Table 8 Rotated factor pattern of influencing root-soil system of maize in immature loess subsoil

项目 Item	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 Factor	特征值 Eigenvalue	差异 Difference	贡献率 Proportion	累积贡献率 Cumulative
x_1	0.938 3*	−0.033 6	0.161 3	1	4.229 0	2.298 5	0.422 9	0.422 9
x_2	−0.748 7*	−0.338 2	−0.251 8	2	1.930 5	0.758 0	0.193 1	0.616 0
x_3	−0.317 2	−0.583 8	−0.494 9	3	1.172 5	0.428 0	0.117 2	0.733 2
x_4	0.751 7*	0.364 2	−0.287 0					
x_5	0.247 8	0.890 4*	0.087 3					
x_6	0.843 1*	0.233 9	0.109 0					
x_7	0.111 1	0.809 7*	0.314 7					
x_8	0.076 8	−0.130 9	0.003 0					
x_9	0.095 8	0.339 9	0.853 7*					
x_{10}	0.213 7	−0.048 6	0.095 9					

: 权重>70%。: weight > 70%.

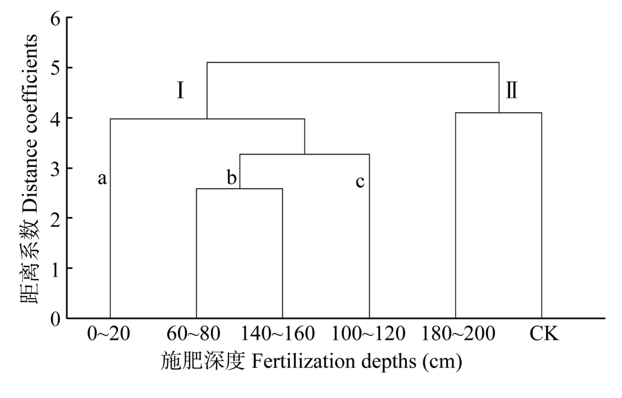


图 1 不同施肥深度玉米根土系统聚类

Fig. 1 Root-soil system cluster of maize in different fertilization depths

研究表明，肥料深施在 10~20 cm 土层较施在表层有利于提高肥料的吸收利用率[26,28]，那么，是不是施肥越深，肥料的吸收利用率越好？作物生产力及土壤肥力越高呢？鉴于此，本团队以玉米为供试作物，以贝特牌生物有机肥为供试肥料，设立施肥深度 0~20 cm、60~80 cm、100~120 cm、140~160 cm、180~200 cm 5 个施肥梯度，探讨生土土壤当年耕层、深层、超深层施肥对玉米地上部生产力、根际土壤肥力垂直分布的影响，为指导生土沃土开发提供理论依据。

苗果园等[34]研究发现，不施肥情况下玉米根系质量由土壤表层向下均呈现出 $Y=A\cdot e^{-BX}$ 递减规律，在土壤表层质量最大，土层越深，向下递减幅度越大。苗果园等[35]研究还发现，将肥料施在 20 cm、50 cm、150 cm、250 cm 的不同土层，其中 20 cm 耕层施肥具有促进根系下扎的作用，150~250 cm 超深层施肥具有诱导根系下扎的作用，而 50 cm 一般深层施肥具有控根生长的作用，且在施肥土层往往形成根团。本试验研究同样发现，CK 不施肥处理组玉米在土壤表层的根重也最大，随着土层加深，根重有所减少；所有施肥深度的根重均以 0~20 cm 处最大，占总根重的 50%左右，然后随根系下延，根重明显递减(P<0.05)；与 CK 不施肥处理相比，施肥在 0~80 cm 处，总根重及 0~20 cm 处根重均明显降低，可能原因是浅层施肥不利于根系下延，与苗果园等的研究结果不一致；而深层施肥诱导根系向下生长，与苗果园等的研究一致；与不施肥处理比较，随施肥深度由 0~20 cm 加深到 140~160 cm，中下层根重及根重比例明显增加，施肥处理促进了该处根系的生长，也符合根系具有趋肥性的特点。玉米是单株生产力比较强的禾本科作物，其地上部的生长离不开强大的根系的有力支撑。本研究中，在 0~120 cm 土层范围内，随施肥深度的加深，玉米地上部茎秆干重、总粒重、百粒重、总根重等所测指标总体均呈递增趋势，有机肥可以促进根系的生长和根系在深层土壤中的分布，根系生长越好，越有利于地上部生产力的提高。所以，在生土地上，采取较深层次施肥可促使作物根系向地下生长，使根系总量增加，从而提高地上部生产力。研究还发现，根系 NPK 养分积累过高或过低，均不能获得最大根重和最大地上部生产力。从根重、根系 NPK 养分积累和地上部生产力结果来看，最适施肥深度为 100~120 cm。

玉米根际土壤酶类受施肥的影响很大。孙瑞莲等[36]研究发现，NPK 与有机肥长期配合施用能明显提高土壤有机质含量、全氮、全磷及速效氮、磷、钾含量，增强土壤转化酶、磷酸酶和脲酶的活性。本试验研究发现深层次施肥其土壤酶活性值高于土壤表层施肥。60~80 cm 的施肥深度有利于提高各土层玉米根际土壤脲酶的活性；140~160 cm 的施肥深度有利于提高各土层玉米根际土壤蔗糖酶的活性。

可能原因是深施肥料促使深层土壤中微生物活性升高, 从而带动土壤酶活性增加。

土壤速效养分含量是评价土壤供肥能力的主要指标[37], 体现着生态环境条件下土壤养分的转化能力及人类的施肥与管理水平等。碱解氮常用来作为土壤总有效氮素供应指标, P 是作物生长的大量元素之一, 和 N 同样是"肥料三要素"之一。徐海[38]研究发现, 碱解氮在 0~20 cm 土层的垂直向梯度不明显, 50 cm 以下土层区域土壤碱解氮含量的变化梯度体现作物的生长发育过程。本研究中, 所有处理的各土层根际土壤碱解氮、速效磷和有机质等 3 类营养含量均明显高于本底土壤, 说明施肥处理和种植玉米对生土地具有一定的培肥效果。在不施肥情况下, 根际土壤 3 类营养总体呈递减趋势, 而施肥改变了这种趋势, 明显提高了施肥土层或其临近土层的 3 类土壤营养的含量, 平均来看, 因施肥深度或土层分布引起的养分含量差异均表现为碱解氮>速效磷>有机质。说明施肥对作物根际土壤营养有较大的改变, 从而对土壤肥力产生深刻的影响。刘玉涛[39]研究表明, 长期施用有机肥, 可以增加土壤有机质及其他各种养分, 提高土壤供肥能力, 改善土壤结构, 所以, 施肥是影响土壤质量, 确保土壤可持续利用的重要农业措施之一[40]。合理的施肥深度是提高肥效的关键所在。

本试验中, 玉米根际脲酶活性的提高促进其他 2 类酶活性的提高(P<0.01, P<0.001)及根际土壤速效磷含量的增加(P<0.05); 根际土壤碱性磷酸酶活性的增加提高了根际土壤有机质含量; 根际土壤蔗糖酶活性的提高促进了根际土壤速效磷含量增加。可见, 根际土壤 3 类酶活性与根际土壤 3 类营养密切相关。通过聚类分析得出改良母质生土地玉米根–土系统的适合施肥深度为 60~160 cm。根系生物量、植株营养同土壤酶类、土壤营养类之间具有紧密的关联。根系生物量的增加, 不仅加强根系内营养物质的流动和分配, 也促进根际土壤酶类、根际土壤营养类含量的增加, 最终促进土壤肥力的增加, 对土壤土质的改良起到积极作用。由于本试验中设置的 5 个施肥梯度中, 从 0~20 cm 到 60~80 cm 的跨度较大, 为 40 cm, 其余相邻施肥梯度之间的跨度皆为 20 cm, 因此所得 60~160 cm 的适合施肥深度是否比 20~60 cm 的施肥深度更好还有待于进一步试验研究, 尤其需补充 20~40 cm 和 40~60 cm 的施肥深度。另外, 目前生产上大马力深松或深翻施肥一体机的最大施肥深度在 40~60 cm, 那么 60 cm 以下的施肥机械能否配套也值得考虑。而对于生土外翻的新造地, 可以考虑先施肥后覆土的方式, 以达到生土改良, 并获得当年生产见效。

黄土母质生土熟化的过程就是土壤物理结构的改变以及土壤营养含量的提升。施肥后, 根系变得发达, 土壤微生物活动频繁, 使土壤中营养元素的转化加快, 植物所能吸收的养分量随之变大, 作物在收割后残留的根系在微生物的作用下腐烂分解, 成为下一年作物的养料, 从而达到改良和提升土壤肥力的效果。因此, 通过适当的施肥促使作物根系向深层生长, 增强根际土壤酶以及土壤营养的含量, 对于改良黄土母质生土地肥力有重要意义。

参考文献 References

[1] Sharma A R, Mittra B N. Effect of combinations of organic materials and nitrogen fertilizer on growth, yield and nitrogen uptake of rice[J]. The Journal of Agricultural Science, 1988, 111(3): 495–501

[2] 刘一. 施肥对黄土高原旱地冬小麦产量及土壤肥力的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 40–42
Liu Y. Influences of fertilization on the yield of winter wheat and soil fertility in dryland of loess plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 40–42

[3] 田小明, 李俊华, 危常州, 等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1111–1118
Tian X M, Li J H, Wei C Z, et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil organic matter fractions, cotton nutrient absorption and yield[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5): 1111–1118

[4] 杨珍平, 张翔宇, 苗果园. 施肥对生土地谷子根苗生长及根际土壤酶和微生物种群的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(4): 802–808
Yang Z P, Zhang X Y, Miao G Y. Effects of fertilizing on millet root-shoot growth, rhizospheric soil enzyme and microbe in immature soil in north China[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(4): 802–808

[5] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809–2819
Lin Z A, Zhao B Q, Yuan L, et al. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2809–2819

[6] 陈欢, 曹承富, 孔令聪, 等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(13): 2580–2590
Chen H, Cao C F, Kong L C, et al. Study on wheat yield stability in Huaibei lime concretion black soil area based on long-term fertilization experiment[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(13): 2580–2590

[7] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长

期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 676–684
Luo K, Hu R G, Zhang W J, et al. Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 676–684
[8] 陈欢, 李玮, 张存岭, 等. 淮北砂姜黑土酶活性对长期不同施肥模式的响应[J]. 中国农业科学, 2014, 47(3): 495–502
Chen H, Li W, Zhang C L, et al. A Research on response of enzyme activities to long-term fertilization in lime concretion black soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(3): 495–502
[9] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 422–429
Li H X, Yuan Y H, Huang Q R, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 422–429
[10] 李玮, 孔令聪, 张存岭, 等. 长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 943–949
Li W, Kong L C, Zhang C L, et al. Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 943–949
[11] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445–1451
Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1445–1451
[12] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2792–2798
Sun F X, Zhang W H, Xu M G, et al. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2792–2798
[13] 朱新玉, 朱波. 不同施肥方式对紫色土农田土壤动物主要类群的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(5): 911–920
Zhu X Y, Zhu B. Effect of different fertilization regimes on the main groups of soil fauna in cropland of purple soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(5): 911–920
[14] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34 (21): 6137–6146
Tao L, Chu G X, Liu T, et al. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6137–6146
[15] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 改变施肥管理后不同肥力稻田土壤 CO_2 的排放特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1399–1406
Zhang L, Yin L C, Yi Y N, et al. Effects of fertilization reforming on the CO_2 flux in paddy soils with different fertilities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1399–1406
[16] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 359–365
Zhang G L, Zhao J N, Song X L, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon and carbon pool management index[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 359–365
[17] 杨珍平, 白志明, 张翔宇, 等. 黄土母质生土当年施肥对谷类作物生产力与根际土壤营养及生物活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 698−705
Yang Z P, Bai Z M, Zhang X Y, et al. Effect of fertilization in immature loess subsoil on productivity and rhizospheric soil nutrient and biological activity of cereal crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 698−705
[18] 刘文, 武继承. 不同肥料配施对砂质潮土玉米产量与土壤培肥的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(3): 63–66
Liu W, Wu J C. Effect of fertilizers application on Corn yield and soil fertility in sandy soil[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(3): 63–66
[19] 刘镜波, 王小林, 张岁岐, 等. 有机肥与种植密度对旱作玉米根系生长及功能的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 32–36
Liu J B, Wang X L, Zhang S Q, et al. Effect of organic fertilizer and planting density on root growth and function of maize in dryland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6): 32–36
[20] 马存金, 刘鹏, 赵秉强, 等. 施氮量对不同氮效率玉米品种根系时空分布及氮素吸收的调控[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 845–859
Ma C J, Liu P, Zhao B Q, et al. Regulation of nitrogen application rate on temporal and spatial distribution of roots and nitrogen uptake in different N use efficiency maize cultivars[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 845–859
[21] 尹彩侠, 李桂花, 张淑香, 等. 氮磷用量与施肥方式对玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(4): 112–115
Yin C X, Li G H, Zhang S X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus application and fertilization methods on maize growth[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(4): 112–115
[22] 刘慧颖, 华利民, 牛世伟. 施氮方式对玉米产量影响及其培肥效果评价[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 407–412
Liu H Y, Hua L M, Niu S W. Effects of different n application methods on maize yields and soil fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(2): 407–412
[23] 刘苗, 孙建, 李立军, 等. 不同施肥措施对玉米根际土壤微生物数量及养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(4): 816–821
Liu M, Sun J, Li L J, et al. Effect of fertilizer treatments on soil microbe amount and nutrition content in rhizosphere of silage maize[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 816–821
[24] 武晓森, 周晓琳, 曹凤明, 等. 不同施肥处理对玉米产量及土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(1): 44–49
Wu X S, Zhou X L, Cao F M, et al. Effects of different fertilization on the corn yield and soil enzyme activity in corn growth period[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,

2015(1): 44–49

[25] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 861–868
Zhan X M, Li T T, Han X R, et al. Effects of nitrogen fertilization m ethods on yield, profit and nitrogen absorption and utilization of spring maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 861–868

[26] 赵亚丽, 杨春收, 王群, 等. 磷肥施用深度对夏玉米产量和养分吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4805–4813
Zhao Y L, Yang C S, Wang Q, et al. Effects of phosphorus placement depth on yield and nutrient uptake of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(23): 4805–4813

[27] Schwab G J, Whitney D A, Kilgore G L, et al. Tillage and phosphorus management effects on crop production in soils with phosphorus stratification[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(3): 430–435

[28] Borges R, Mallarino A P. Deep banding phosphorus and potassium fertilizers for corn managed with ridge tillage[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 376–384

[29] 刘婷婷, 赵颖红, 杨珍平, 等. ‘舜麦 1718’和‘中麦 175’在晋中晚熟冬麦区的生育表现[J]. 中国农学通报, 2014, 30(15): 56–61
Liu T T, Zhao Y H, Yang Z P, et al. The development behavior of ‘shunmai 1718’ and ‘zhongmai 175’ in late-maturing winter wheat region in Jinzhong[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(15): 56–61

[30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263–271
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 263–271

[31] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983: 260–339
Guan S Y. Soil Enzyme and Its Study Method[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1983: 260–339

[32] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987
Zhou L K. Soil Enzymology[M]. Beijing: Science Press, 1987

[33] 吕英华, 秦双月. 测土与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 48–84
Lü Y H, Qin S Y. Soil Testing and Fertilizer[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 48–84

[34] 苗果园, 尹钧, 张云亭, 等. 中国北方主要作物根系生长的研究[J]. 作物学报, 1998, 24(1): 1–6
Miao G Y, Yin J, Zhang Y T, et al. Study on root growth of main crops in north China[J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(1): 1–6

[35] 苗果园, 高志强, 张云亭, 等. 水肥对小麦根系整体影响及其与地上部相关的研究[J]. 作物学报, 2002, 28(4): 445–450
Miao G Y, Gao Z Q, Zhang Y T, et al. Effect of water and fertilizer to root system and its correlation with tops in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(4): 445–450

[36] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 406–410
Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S, et al. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(4): 406–410

[37] 郭胜利, 刘文兆, 史竹叶, 等. 半干旱区流域土壤养分分布特征及其与地形、植被的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 40–43
Guo S L, Liu W Z, Shi Z Y, et al. Soil nutrients distribution and its relation to landform and vegetation at small watershed in semiarid area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(4): 40–43

[38] 徐海. 旱地农田土壤营养协调疲劳症及其发生机理[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011
Xu H. Soil nutrient harmony fatigue symptom and its occurrence mechanism on dry farmland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011

[39] 刘玉涛. 旱地玉米施用有机肥的定位研究[J]. 玉米科学, 2003, 11(2): 86–88
Liu Y T. Study on the fixed position of applying organic fertilizer on maize fields of dry land[J]. Journal of Maize Sciences, 2003, 11(2): 86–88

[40] 李秀英, 赵秉强, 李絮花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1591–1599
Li X Y, Zhao B Q, LI X H, et al. Effects of different fertilization systems on soil microbe and its relation to soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1591–1599